



Philosophia Scientiae

Travaux d'histoire et de philosophie des sciences

15-3 | 2011

L'espace et le temps

La disparition du temps en gravitation quantique

Alexis de Saint-Ours



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/692>

DOI : 10.4000/philosophiascientiae.692

ISSN : 1775-4283

Éditeur

Éditions Kimé

Édition imprimée

Date de publication : 1 octobre 2011

Pagination : 177-196

ISBN : 978-2-84174-569-2

ISSN : 1281-2463

Référence électronique

Alexis de Saint-Ours, « La disparition du temps en gravitation quantique », *Philosophia Scientiae* [En ligne], 15-3 | 2011, mis en ligne le 01 novembre 2014, consulté le 01 mai 2019. URL : <http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/692> ; DOI : 10.4000/philosophiascientiae.692

Tous droits réservés

La disparition du temps en gravitation quantique

Alexis de Saint-Ours

REHSEIS, Université Paris Diderot (France)

Résumé : Le but de ce travail est d'examiner l'incidence philosophique de la gravitation quantique sur le concept de temps. Je cherche à montrer qu'elle conduit à une disparition du temps comme dimension et ouvre la voie à une compréhension du temps comme variation et même à l'idée de variation pure. En l'absence de temps mécanique, il est cependant possible de définir un temps d'origine thermodynamique. Je montre en quoi cette dissociation du temps mécanique et du temps thermodynamique, fait écho à l'ambivalence — qui est au cœur de la physique comme de la philosophie — entre le devenir et le temps comme mesure du changement. Enfin, je suggère que la gravité quantique concourt à l'inversion de la définition aristotélicienne du temps.

Abstract: One of the philosophical consequences of quantum gravity on time is that time is not a dimension along which everything flows, that mechanical time is inappropriate and that there can be change without time. But this timelessness of quantum gravity is not the disappearance of all types of time. Indeed, a thermodynamical notion of time, that captures the notion of irreversibility, still stands in a context where there is no background metric. This might overrun an ambivalence that one finds in physics and philosophy between time as the measure of change and change itself. We conclude by conjecturing that quantum gravity might lead to the idea that change is the measure of time.

We need to go back to the insights behind general relativity and quantum field theory, learn to hold them together in our minds, and dare to imagine a world more strange, more beautiful, but ultimately more reasonable than our current theories of it. For this daunting task, philosophical reflection is bound to be of help.
[Baez 2001, 177]

1 Le problème du temps en gravitation quantique

1.1 Introduction

Le terme de gravitation quantique fait référence à de très nombreuses théories en cours d'élaboration et non corroborées par l'expérience. On peut néanmoins les regrouper en trois familles¹ : tout d'abord, l'ensemble des procédures qui appliquent les règles de quantification à la relativité générale, avec deux tendances particulièrement remarquables, les approches covariantes et les approches canoniques comme la géomérodynamique et la gravité quantique à boucles qui font usage du formalisme hamiltonien ; ensuite, la théorie des supercordes ou M-théorie ; enfin toutes les autres approches, par exemple la théorie des twisteurs de Roger Penrose, les causetes ou encore la géométrie non-commutative.

Les formalismes canoniques en gravitation quantique sont fondés sur une quantification de la relativité générale formulée dans un cadre hamiltonien. Les pionniers de cette approche sont notamment Dirac, Bergmann, Arnowitt, Deser, Misner, Wheeler et DeWitt. La gravité quantique à boucles repose sur la reformulation par Abhay Ashtekar en 1986 de la relativité générale en termes de nouvelles variables. Liées à la notion de connexion, ces variables ont permis de simplifier la formulation hamiltonienne de la relativité générale et, ainsi, faciliter les procédures de quantification. Cette « mise en forme » met en évidence le caractère dynamique des équations d'Einstein, puisqu'elle rend

1. Nous suivons à l'identique Claus Kiefer : “Concerning now the attempt to construct a full quantum theory of gravity, the question arises: What are the main approaches? In brief, one can distinguish between

- *Quantum general relativity*: The most straightforward attempt, both conceptually and historically, is the application of ‘quantization rules’ to classical general relativity. This approach can be divided further into
 - *Covariant approaches*: These are approaches that employ four-dimensional covariance at some stage of the formalism. Examples include perturbation theory, effective field theories, renormalization-group approaches, and path integral methods.
 - *Canonical approaches*: Here one makes use of a Hamiltonian formalism and identifies appropriate canonical variables and conjugate momenta. Examples include quantum geometrodynamics and loop quantum gravity.
- *String theory (M-theory)*: This is the main approach to construct a unifying quantum framework of all interactions. The quantum aspect of the gravitational field only emerges in a certain limit in which the different interactions can be distinguished.
- Other fundamental approaches such as a direct quantization of topology, or the theory of causal sets” [Kiefer 2007, 4].

compte de l'évolution de la métrique spatiale dans le temps : on parle alors de feuilletage de l'espace-temps.

Le temps joue un rôle problématique dans les approches canoniques. Cela n'a rien d'étonnant : le temps de la mécanique quantique ou de la théorie quantique des champs et le temps tel qu'il intervient en relativité générale ne sont pas compatibles. En effet, le temps de la mécanique quantique est un temps de nature substantielle. La variable t qui intervient dans l'équation de Schrödinger, $i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi$, est le temps absolu newtonien : paramètre externe et non dynamique.

En théorie quantique des champs, la situation est similaire puisque le temps absolu est remplacé par l'espace-temps de Minkowski. Cet espace-temps est également de nature substantielle puisqu'il constitue un « *background* », une plate-forme externe et non dynamique qui n'interagit pas avec les champs en considération.

Comme on va le voir, cette situation est radicalement différente en relativité générale mais, avant cela, présentons brièvement le débat qui oppose temps relationnel et temps substantiel.

1.2 Espace et temps substantiels *vs.* espace et temps relationnels²

La physique a longtemps été partagée entre deux conceptions radicalement différentes de la nature de l'espace. Selon l'une, l'espace peut être conçu à l'instar d'une arène ou d'une scène accueillant l'ensemble des corps matériels ou, du moins, la catégorie très générale des « objets » peuplant l'univers³. L'espace existe alors en soi et les objets physiques se meuvent *dans* l'espace. On reconnaît là la figure de l'espace absolu newtonien. Selon l'autre, l'espace est de nature relationnelle. Cela veut dire que le monde est fait d'objets physiques, mais cela ne signifie pas que les corps matériels sont *dans* le monde, bien au contraire. L'espace n'est rien d'autre que la relation de contiguïté ou de coexistence que les objets entretiennent respectivement. Selon la conception substantielle, il y a dans l'univers deux types d'objets, les corps et l'espace, alors que, selon la conception relationnelle, il n'y a que les entités physiques⁴.

On peut se demander si, à l'instar de l'espace, le temps est de nature substantielle ou de nature relationnelle. Le temps absolu newtonien est l'archétype d'une conception substantielle : il n'est pas affecté par les événements

2. D'après [Rovelli 2004] et [Saint-Ours 2006].

3. Loin de nous l'idée selon laquelle l'univers ne serait composé que de corps matériels au sens strict. Par objet, nous renvoyons à l'ensemble des « entités » physiques susceptibles de peupler le monde : corps, champs, cordes, etc., cf. [Rovelli 2004].

4. Le terme de relationnel n'est pas équivalent à celui de relativiste. Par exemple, la théorie de la relativité restreinte n'est pas une théorie relationnelle de l'espace et du temps.

et constitue, telle une grande horloge universelle, le cadre objectif du devenir des entités physiques. Parce qu'il s'écoule uniformément, il est de nature homogène. C'est cet écoulement uniforme qui permet de rendre compte objectivement et sans faillir d'un mouvement ou d'une évolution qui se déroule en son sein. En outre, la possibilité d'un temps vide est réelle : l'ensemble des mouvements de l'univers pourrait cesser, le temps newtonien serait théoriquement l'outil qui permettrait de préciser combien de temps cette absence de changement a duré. Comme on le sait, Leibniz a élaboré sa théorie relationnelle de l'espace et du temps à l'encontre des conceptions spatio-temporelles de Newton. Selon Leibniz, l'espace et le temps ne sont que des relations. L'espace est l'ordre des coexistants et le temps est l'ordre des successions. L'espace et le temps n'ont pas de valeur ontologique mais une valeur logique : celle d'une relation d'ordre.

Par ailleurs, il apparaît que les éléments substantiels d'une théorie physique sont ses caractères non dynamiques. En d'autres termes, l'opposition substantiel/relationnel renvoie très largement à l'opposition statique/dynamique. Par dynamique, il faut entendre les éléments d'une théorie physique déterminés par des lois et par statique, la proposition contraire.

1.3 Temps local et temps global

La distinction entre deux types de changement conduit à mettre en évidence deux conceptions du temps⁵ : l'une locale et l'autre globale. En effet, il faut distinguer entre le changement de position d'un corps dans l'espace au cours d'un certain intervalle de temps, autrement dit le mouvement, et le changement qualitatif ou quantitatif, au cours du temps, des propriétés d'un corps qui demeure immobile pour une certaine classe de référentiels.

Le mouvement conduit à la notion de temps global puisqu'il implique l'idée de différents lieux ou positions du corps et ce, à différents instants ou moments du temps, tandis que le changement de propriétés conduit à l'idée d'un temps local puisqu'il ne fait pas intervenir de déplacements dans l'espace.

Le temps newtonien assimile temps local et temps global : c'est le temps absolu ou universel dont l'image nous est donnée par l'idée d'un grand horloger cosmique. Pour le dire de façon plus pragmatique, des horloges initialement synchronisées puis dispersées dans tout l'espace donneront toutes les mêmes indications. Or c'est précisément cela qui va être contesté par Einstein et d'autres et, ainsi, conduire en 1905 au remplacement de la cinématique newtonienne par la chronogéométrie des transformations de Lorentz.

En relativité restreinte, du fait de la relativité de la simultanéité, le temps global — qui sert à rendre compte d'événements se produisant à une certaine distance l'un de l'autre — est relatif au choix du référentiel inertiel. À la

5. À l'instar de [Stachel 2005].

question : « Les lampes se sont-elles allumées en même temps ? », le relativiste répond : « Cela dépend du référentiel dans lequel vous vous placez. »

Quant au temps local, c'est le temps propre qui dépend du trajet dans l'espace-temps. Les lignes d'univers qui partent d'un point de l'espace-temps pour aller à un autre sont nombreuses. Or, du fait de la géométrie hyperbolique caractéristique de l'espace-temps minkowskien, le temps propre entre deux événements pris le long d'une ligne d'univers courbe est inférieur au temps propre entre les deux mêmes événements mesuré le long d'une ligne d'univers droite. Cela explique que, dans l'expérience de pensée du voyageur de Langevin ou pseudo-paradoxe des jumeaux, le jumeau voyageur est plus jeune, au terme de son aller-retour dans l'espace, que le jumeau sédentaire (cf. [Boratav & Kerner 1991] et [Luminet 1994]).

La relativité restreinte dissocie donc temps local et temps global. Cependant, l'espace-temps newtonien et l'espace-temps minkowskien ont en commun la présence d'une trame de fond : espace et temps absolus en mécanique classique, espace-temps en relativité restreinte⁶. En d'autres termes, ces deux théories reposent sur une démarcation claire et nette entre cinématique et dynamique.

1.4 Le problème du temps

En relativité générale, la situation est radicalement différente puisqu'en raison du principe de covariance généralisée — qui manifeste l'indifférence de la théorie au choix des coordonnées⁷ — la théorie d'Einstein ne possède pas de variables que l'on puisse naturellement identifier au temps. Manifestement, cela contredit la théorie quantique puisque cette dernière repose sur une figure bien particulière du temps, en l'occurrence le temps newtonien. En d'autres termes, la variable t qui apparaît dans l'équation de Schrödinger est en contradiction flagrante avec la covariance de la relativité générale.

Que se passe-t-il en gravitation quantique canonique ? L'équation de base de la géométrodynamique est l'équation de Wheeler-DeWitt (WDW). Or cette équation d'évolution ne contient pas de variable temps. Cette caractéristique inhabituelle et pour le moins étonnante est l'une des facettes de ce qu'il est convenu d'appeler le problème du temps en gravité quantique : la principale équation dynamique est une équation qui ne prend pas en compte l'évolution *dans* le temps. C'est d'ailleurs la condition de covariance, appliquée aux équations d'évolution de la gravitation quantique, qui conduit à cette atemporalité :

6. En relativité restreinte, c'est l'invariant des transformations de Lorentz qui détermine *a priori* la mesure de distances spatiotemporelles entre deux événements : $ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$.

7. Pour une présentation détaillée de la notion de covariance, cf. [Lachize-Rey 2003, 2008] et [Barrau & Grain 2011].

Point commun à toutes les approches canoniques conventionnelles de la gravitation quantique, sa formulation dépend directement d'une description tridimensionnelle plutôt que d'une description spatio-temporelle plus globale. Comme nous l'avons vu, la partie tridimensionnelle du problème de « covariance générale » est bien prise en compte par les états de boucles ou de réseaux de spins, mais l'extension à une covariance générale pour tout l'espace quadridimensionnel ouvre une véritable « boîte de Pandore ». [...] La difficulté est liée à la manière dont l'évolution temporelle, conformément à l'équation d'Einstein, peut être exprimée dans un formalisme quadridimensionnel généralement covariant. La question est en rapport avec ce que l'on appelle « le problème du temps » en gravitation quantique (ou, parfois, le « problème du temps figé ».) En relativité générale, il est impossible de distinguer l'évolution temporelle d'un simple changement de coordonnées (c'est-à-dire du simple remplacement de la coordonnée temps par une autre). Un formalisme généralement covariant devant être aveugle à de tels changements de coordonnées, le concept de l'évolution temporelle devient profondément problématique. » [Penrose 2004, 918]

1.5 Parménidiens *vs* héraclitéens

Cette situation a conduit certains auteurs à affirmer le caractère parméni-dien de l'espace-temps quantique. Le plus illustre représentant de cette tradition est Julian Barbour qui a construit une théorie machienne de la géométrodynamique destinée à mettre en évidence le caractère illusoire du devenir et qui affirme qu'au niveau de l'échelle de Planck il n'y a ni temps, ni changement. Barbour soutient que la gravitation quantique décrit un univers statique⁸ pour lequel l'équation de WDW donne les probabilités relatives de toutes les configurations tridimensionnelles possibles de l'univers.

Bon nombre de physiciens⁹ se sont fortement opposés à de telles théories au nom d'une croyance naïvement héraclitéenne au caractère irréductiblement

8. "The quantum universe is *static*. Nothing happens; there is being but no becoming. The flow of time and motion are illusions" [Barbour 2008, 2].

9. "Attempts to quantize general relativity encounters an odd problem. The Hamiltonian that normally generates time evolution vanishes in the case of general relativity as a result of diffeomorphism invariance. The theory seems to be saying that time does not exist. The most obvious feature of our world, namely that *time seems to progress and that the world changes accordingly becomes a problem* in this presumably fundamental theory" [Dreyer 2008, 1. C'est nous qui soulignons].

Cf. également, ce dialogue entre DeWitt et Kuchař : "DeWitt: you want a "time". You want to see something evolve. Kuchař: I do not *want* to see things evolving. I *see* things evolving and I want to *explain* why I see them evolving." [Ashtekar & Stachel 1991, 171].

temporel de la réalité. Peut-on, à l'instar de Fotini Markopoulou¹⁰, refuser cette atemporalité de la gravitation quantique en affirmant qu'elle contredit notre expérience immédiate ?

Au cœur de cette opposition est la question de savoir si l'on a besoin d'un concept de temps pour rendre compte des notions d'évolution, de changement, ou encore de variation. Les choses peuvent-elles varier, évoluer ou encore changer sans temps posé *a priori* ? Comme on va tenter de le montrer, l'évidence à l'œuvre autour de nous dans la nature n'est pas comme l'affirment Markopoulou et Dreyer celle du temps, mais celle du changement sous toutes ses formes, autrement dit celle du devenir. Dreyer, Kuchař et Markopoulou semblent dire que, sans temps, changement, évolution ou encore variation sont impensables. De deux choses l'une : soit le temps est la même chose que le changement et, en effet, il est problématique d'avoir une équation d'évolution qui dit que le temps n'existe pas, soit le temps est autre chose que le changement, et alors il n'est pas conceptuellement incohérent d'avoir du changement sans temps. Autrement dit, l'absence de temps n'implique pas *ipso facto* l'impossibilité de penser le changement.

2 Physique sans temps

2.1 Cinématique et dynamique en relativité générale

Comme on l'a vu, aussi bien la physique newtonienne que la relativité restreinte reposent sur une distinction nette entre cinématique et dynamique. Or c'est précisément cela qui disparaît avec la relativité générale. En effet, en relativité générale, la structure d'espace-temps devient dynamique : elle n'est plus fixée *a priori* mais devient dépendante des différents processus physiques. Cette interdépendance entre la métrique et le contenu matériel de l'univers rend intenable la distinction faite, en physique classique, entre cinématique et dynamique. On parle alors de « *background independence* », indépendance de fond ou encore absence de trame de fond. Cette caractéristique de la relativité générale est, pour beaucoup, bien plus fondamentale que la révolution apportée par la relativité restreinte qui — rappelons-le une dernière fois — dépend d'une trame de fond non dynamique qui détermine *a priori* la localisation spatio-temporelle.

Ce point est bien évidemment lié au problème qu'a eu Einstein avec la question de la signification des coordonnées : ces dernières n'ont pas de signification physique, c'est-à-dire qu'elles ne repèrent pas de points particuliers de

10. "There are two kinds of people in quantum gravity. Those who think that timelessness is the most beautiful and deepest insight in general relativity, if not modern science, and those who simply cannot comprehend what timelessness can mean and see evidence for time in everything in nature" [Markopoulou 2008, 1].

l'espace ou de l'espace-temps. Ce n'est qu'une fois équipées d'une métrique, que les distances entre points prennent sens. Cependant, il y a plus dans la notion de « *background independence* » que dans la notion de covariance généralisée. Tout d'abord, il faut remarquer que l'exigence de covariance est à elle seule une exigence triviale : il est tout à fait possible de reformuler de façon covariante, i.e. au moyen de coordonnées arbitraires d'espace et de temps, aussi bien la physique newtonienne que la relativité restreinte. La « *background independence* » est plus exigeante puisqu'elle interdit les structures *a priori*, statiques, absolues ou substantielles, autrement dit les structures indépendantes des processus physiques. Techniquement, l'indépendance de fond est réalisée par l'intermédiaire de la notion d'invariance par difféomorphisme actif¹¹.

Avant d'en venir à la façon dont l'évolution est prise en compte et calculée en relativité générale, examinons l'idée d'Einstein selon laquelle espace-temps et champ gravitationnel sont une seule et même chose. Elle peut s'interpréter de deux façons. La première, la plus répandue, peut s'énoncer comme suit : l'espace-temps est courbe et la gravitation est un effet de cette courbure. La deuxième est celle de bon nombre de relativistes et de théoriciens de la gravitation quantique pour qui, plutôt que de voir la gravitation comme une conséquence de la courbure de l'espace-temps, il est plus intéressant — notamment dans le cadre d'une perspective relationnelle — d'admettre que la relativité générale consacre la disparition de l'espace-temps en tant qu'entité, et ce, au profit du champ gravitationnel. L'univers physique n'est pas peuplé de champs et de particules dans l'espace-temps, il est peuplé de champs et de particules.

Venons-en maintenant à la notion d'évolution. Que devient-elle dans un contexte « *background independent* » ? Comment penser une évolution sans espace et sans temps posés *a priori* ? On comprend bien que la dynamique ne peut plus être exprimée de façon usuelle, relativement à une structure absolue, mais cela n'implique pas que la relativité générale rende caduque toute évolution ou dynamique. Il a fallu tout le travail de Bergmann, Komar, DeWitt, Wheeler, Barbour, Stachel et plus récemment d'Ashtekar, de Rovelli ou de Smolin pour comprendre qu'en relativité générale la localisation spatio-temporelle ne se fait pas relativement à une trame de fond inerte mais relationnellement¹² :

Thus, a general relativistic theory does not deal with values of dynamical quantities at given spacetime points: it deals with values

11. La notion d'invariance par difféomorphisme (actif) permet de se conformer aussi bien à l'exigence de covariance généralisée qu'à l'interdit quant à tous types de structures absolues. Cf. [Rovelli 2004, 2.2] et [Giulini 2007].

12. Là encore, il faut se rappeler de l'intuition d'Einstein selon laquelle ce qui est réel ce ne sont pas les coordonnées mais les coïncidences d'espace-temps comme le croisement de deux lignes d'univers. Cf. [Balibar & Toncelli 2008, 177–182].

of dynamical quantities at “where” ’s and “when” ’s determined by other dynamical quantities. [Rovelli 2007, 1310]

La relativité générale décrit le mouvement des différents objets les uns par rapport aux autres et non relativement à l’espace-temps :

Objects do not move with respect to space-time, nor with respect to anything external: they move in relation to one another. General relativity describes the relative motion of dynamical entities (fields, fluids, particles, planets, stars, galaxies) in relation to one another. [Rovelli 1999, 215]

L’espace et le temps sont de nature relationnelle. Nous n’habitons pas l’espace et nous n’évoluons pas dans ou selon le temps :

The time along which dynamics develops is discarded from general relativity, as well as the space in which dynamics takes place. [Rovelli 1999, 212]

2.2 La dynamique atemporelle de la relativité générale

Toute une partie du travail de Carlo Rovelli a visé à montrer que, en relativité générale, ce n’est jamais l’évolution selon un certain temps t qui est mesurée, c’est l’évolution relative de variables dynamiques. Ce qui relève du changement en général est décrit non pas en termes d’évolution dans le temps mais en termes de corrélations de variables dynamiques¹³ :

In classical GR , there is no meaning to $R(t)$. There is no meaning to the value of the radius of the universe *at some coordinate time* t . What is meaningful is, say, the radius R' of the universe when a given supernovae explodes. This quantity R' is well defined, and—in principle—we can ask for its value in quantum gravity. The observables of general relativity are the *relative* (spatial and temporal) positions (contiguity) of the various dynamical entities in the theory, in relation to one another. Localization is only relational within the theory. This is the relational core of general relativity; almost a homage to its Leibnizian lineage. [Rovelli 1999, 216]

Ce caractère relationnel de l’évolution a conduit Carlo Rovelli à l’élaboration d’un formalisme susceptible d’élargir cette « physique sans temps » aussi

13. Plus précisément, en termes de corrélations d’observables partielles. Sur la distinction entre observable partielle et observable complète, cf. [Rovelli 2002].

bien à la mécanique classique qu'à la mécanique quantique. L'un des intérêts de ce formalisme, c'est qu'il est cohérent avec les aspects les plus pratiques de la mesure du temps. En effet, on ne mesure jamais le temps, on mesure bien plutôt les oscillations d'un pendule, les vibrations d'un cristal de quartz, l'écoulement d'un sablier ou encore la combustion d'une bougie. Nos mesures d'évolution sont toujours des corrélations de variables dynamiques. Par exemple, quand j'affirme — montre à l'appui — que mon pendule a réalisé vingt-cinq allers-retours en une minute, je ne fais que corréler deux variables dynamiques entre elles : le parcours de ma trotteuse sur 360 degrés et les oscillations plus ou moins périodiques dudit pendule.

Ce formalisme relationnel est équivalent, en ce qui concerne la mécanique classique, au formalisme newtonien de l'évolution. En d'autres termes, les mesures relationnelles que l'on obtient, $a(b), b(c), c(d)$, sont équivalentes à des mesures d'évolution dans le temps : $a(t), b(t), c(t), \dots$. D'où l'idée de voir, dans un cadre général, la mécanique comme une théorie relationnelle entre observables partielles. Dans cette perspective, la mécanique newtonienne est la limite classique de cette théorie plus générale dans laquelle une observable partielle acquiert le statut de variable indépendante. En effet, aux échelles qui sont les nôtres, quand je compare mes corrélations entre elles, je constate aisément qu'il m'est tout aussi possible d'exprimer l'évolution de mes variables en fonction d'un certain paramètre externe et non dynamique, en l'occurrence ici une figure plus ou moins proche du temps newtonien.

Carlo Rovelli soutient par ailleurs que cette équivalence entre des mesures relationnelles de l'évolution et des mesures d'évolution relativement au temps ne vaut qu'à une certaine échelle et disparaît au niveau de l'échelle de Planck :

In particular, it gives us confidence that to assume the existence of the *unobservable physical* quantity t is a useful and reasonable thing to do. Simply: the usefulness of this assumption is lost in quantum gravity. The theory allows us to calculate the relations between observable quantities, such as $A(B), B(C), A(T_1), T_1(A), \dots$, which is what we see. But it does not give us the evolution of these observable quantities in terms of an observable t , as Newton's theory and special relativity do. In a sense, this simply means that there is no good clocks at the Planck scale. [Rovelli 2004, 30]¹⁴

14. Pour bien comprendre pourquoi la situation est encore plus radicale en gravité quantique qu'en relativité générale, il faut ajouter que, en relativité générale, quand bien même il n'existe pas de variables privilégiées pour exprimer la dynamique, il n'en demeure pas moins qu'à une solution des équations d'Einstein, correspond un espace-temps bien défini et ce à la différence de la gravité quantique où l'espace-temps disparaît de la même façon que la notion de trajectoire en mécanique quantique. Cf. [Rovelli 2004, 31].

Cette absence de temps au niveau fondamental, plus exactement cette absence de bonnes horloges au niveau de l'échelle de Planck, a conduit Carlo Rovelli et Alain Connes à explorer les mécanismes de son émergence¹⁵. Ce qui ressort de ce travail, c'est que la disparition du temps est avant tout une disparition du temps mécanique car aussi bien en relativité générale que, semble-t-il, en gravité quantique, il demeure possible de construire un temps thermique ou thermodynamique¹⁶.

3 Incidences philosophiques

L'originalité de la gravité quantique consiste à prendre au sérieux la révolution conceptuelle inaugurée par la relativité générale quant à nos conceptions de l'espace et du temps. Ce que recherchent les théoriciens des boucles, c'est la signification physique d'une théorie quantique de la gravitation indépendante du fond. Quelle en est l'éventuelle portée philosophique¹⁷ ? Comme on va tenter de le mettre en évidence, il se dégage de cette théorie l'idée selon laquelle l'espace et le temps ne sont pas les contenants inertes du devenir et de la localisation.

3.1 Le temps est-il le réceptacle inerte du changement ?

Il est courant d'affirmer que les choses deviennent *dans* le temps. Le temps est-il le milieu immobile de ce qui se déploie ou l'essence profonde du devenir ? Préexiste-t-il à tout changement, en est-il la structure d'accueil préalable, ou est-ce plutôt le devenir qui lui est antérieur ? Doit-on identifier temps et devenir ou les dissocier et voir dans le temps le réceptacle inerte de l'ensemble de ce qui advient ?

On trouve l'idée du temps contenant — à travers l'expression « dans le temps » — aussi bien chez Aristote que chez saint Augustin ou Plotin. Elle renvoie à l'une de ses incarnations substantielles qui l'assimile à un milieu homogène accueillant toutes choses.

15. C'est l'hypothèse du temps thermique ou « *thermal time* ».

16. Sur le rapport temps mécanique/temps thermodynamique, leur coïncidence en physique newtonienne et leur dissociation en relativité générale, cf. [Rovelli & Smerlak 2010].

17. Ou, pour parler comme Merleau-Ponty, à la suite de London et Bauer, on peut se demander à quelles « découvertes philosophiques négatives » est susceptible de nous conduire la gravitation quantique. Sur la portée de cette intuition sur les catégories traditionnelles de la substance, de l'élémentarité, de la causalité ou encore de l'individualité, cf. [During & Lévy-Leblond 2009]. On pourrait également, à l'instar de [Evans 2010], parler de contraintes relativistes pesant sur les métaphysiques du temps.

Les philosophes ont par ailleurs livré des réponses divergentes à cette question du rapport du temps et du devenir (cf. [Barreau 1988]). Pour Kant, il y a une différence profonde entre temps et devenir. Le temps, inhérent au sujet percevant, n'est pas seulement condition de l'apparaître, il est également le milieu neutre et immobile dans lequel les choses deviennent¹⁸. Contre Kant, Hegel va procéder à une identification du temps et du devenir : « *ce n'est pas dans le temps que tout naît et périt, mais le temps lui-même est ce devenir* » [Hegel 1830, 144].

Par ailleurs, notre usage ordinaire du concept de temps est caractérisé, soulignons-le, par une certaine ambivalence : il renvoie tantôt au devenir, tantôt à la structure du devenir. Rémy Lestienne [Lestienne 1985] a suggéré qu'une telle ambiguïté était également présente en physique entre temps mécanique et temps thermodynamique, autrement dit le temps en tant que mesure du changement et ce changement lui-même, caractérisé par l'irréversibilité et découvert ou redécouvert par la thermodynamique avec la notion d'entropie¹⁹.

Dans *Réflexions sur le temps*, Desanti, à la suite de Husserl, conseille de mettre entre parenthèses le temps objectif des horloges, de s'abstraire et de mettre hors circuit notre usage des calendriers et des emplois du temps. Il explique à son interlocuteur que l'enjeu d'une telle ascèse est d'oublier par-dessus tout :

le sens ordinaire de la préposition "dans" que nous utilisons spontanément lorsque nous parlons de notre expérience du temps. C'est même cet usage, tellement ancien, qui devrait faire l'objet de notre examen. Vraiment il serait étrange que ce que nous avons appris à nommer "temps" puisse *contenir* quoi que ce soit. Et cependant nous disons sans inquiétude: "C'est *dans* le temps que tout se passe." Or ce qui se passe "dans" le temps n'y demeure pas comme en un lieu. [Desanti 1992, 104]

Et Desanti d'expliquer que la phénoménologie a pour tâche, lorsqu'elle s'attelle à la question du temps, de défaire cette conception ordinaire du temps comme demeure ou comme lieu de ce qui passe, change ou se déroule. Dire du temps qu'il est ce dans quoi les choses passent, c'est, implicitement ou non, faire de lui un contenant, un réceptacle, ou encore un milieu homogène. C'est précisément à une telle conception que s'opposent les philosophies de Bergson²⁰, de Husserl ou de Heidegger (cf. [Dastur 1990, 16]).

18. Cf. *Critique de la Raison Pure*, Première Analogie de l'expérience.

19. Il est intéressant de croiser cette idée avec le travail de Rovelli-Smerlak évoqué plus haut. La gravitation quantique réalise-t-elle le dépassement de cette ambivalence ?

20. Chez Bergson, les choses ne deviennent pas ou ne passent pas *dans* le temps précisément parce que le temps n'est pas de l'espace, c'est-à-dire un contenant neutre ou homogène.

Or il est notable que ces trois penseurs, tout en dénonçant cette conception du temps comme réceptacle, voient, chacun à sa façon, dans la physique, la discipline ayant inventé, développé et même réifié — pour en tirer à leurs yeux des conséquences métaphysiques inacceptables²¹ — cette même conception du temps qu'ils dénoncent. Comme si, par ailleurs, la physique était prisonnière de façon congénitale de cette conception du temps pensé et appréhendé comme milieu homogène, déterminée par essence à ne jamais pouvoir en sortir et condamnée à devoir en déployer les diverses figures de Newton jusqu'à Einstein et au-delà.

C'est pourtant au sein même du temps objectif qu'un tel questionnement se fait aujourd'hui entendre. Nul besoin donc de suspendre et de mettre entre parenthèses les acquis de la mesure : c'est au sein de la physique, au travers de la relativité générale et de sa problématique unification avec la théorie quantique, qu'un tel rapport est à nouveau interrogé comme tel. Et ce qu'énonce la relativité générale c'est qu'il n'y a pas de sens à affirmer que le temps est la trame de fond qui permette de rendre compte du devenir, du changement ou de l'évolution.

Peut-on pour autant, à l'instar de Hegel, identifier temps et devenir ? Le temps n'est-il rien d'autre que le changement ? Avant de répondre par la négative à cette question et de proposer en conséquence une troisième option, venons-en à la distinction opérée par Lautman entre le temps comme dimension et le temps comme variation.

21. Comme par exemple la réversibilité du temps. Il a beaucoup été question dans les rapports de Bergson à la relativité de *Durée et simultanéité* — cf. [During 2011]. Il est également intéressant de souligner que bon nombre d'intuitions bergsoniennes font écho au statut du temps et du changement en relativité générale et en gravitation quantique. Nous nous contenterons d'en énumérer trois :

- Tout d'abord, il y a chez Bergson cette idée — qui n'est pas sans rappeler la *background independence* — que les choses changent mais qu'elles ne changent pas dans le temps : « Il y a des changements, mais il n'y a pas, sous le changement, de choses qui changent : le changement n'a pas besoin d'un support » [Bergson 1934, 163].
- Par ailleurs, au regard de la spatialisation du temps à l'œuvre en physique et justement critiquée par Bergson, il est indéniable que l'idée de Rovelli d'une physique mettant en œuvre des corrélations de variables dynamiques échappe au travers de la spatialisation. Non seulement les philosophes ont reproché aux physiciens de faire du temps un milieu homogène mais on leur a également reproché — c'est bien évidemment lié — de spatialiser le temps : les mesures de temps sont toujours des mesures d'espace, de longueurs, ce que Bergson appelle des multiplicités quantitatives où la succession est saisie par l'entremise de la juxtaposition.
- Enfin, il nous semble que Rovelli ne renierait pas cette idée de Bergson pour qui ce qui caractérise la science moderne c'est d'avoir érigé le temps en variable indépendante : « la science moderne doit se définir surtout par son aspiration à prendre le temps comme variable indépendante » [Bergson 1907, 335].

3.2 Du temps comme dimension au temps comme variation

Dans un texte publié en 1946 [Lautman 1946], consacré au problème du temps, Lautman explique la nécessité de distinguer en physique le temps-paramètre du temps-coordonnée²². Soient les trois énoncés suivants : « le temps s'écoule toujours dans le même sens » ; « les objets matériels persistent au cours du temps » ; « les grandeurs qui caractérisent les systèmes dynamiques varient en fonction du temps ». Les deux premières propositions renvoient à l'idée d'un temps-dimension, ou temps-coordonnée, alors que la troisième renvoie à l'idée d'un temps-paramètre ou temps-variation.

Il faut se garder, nous dit Lautman, d'identifier le paramètre temps, qui intervient dans l'énoncé des lois de la nature — simple facteur d'évolution — au temps irréversible de la durée des choses. Il ajoute d'ailleurs que l'évolution d'un système pourrait parfaitement être étudiée en fonction d'une autre grandeur prise comme variable indépendante.

Si la physique classique fut légitimement amenée à identifier temps-paramètre et temps-dimension (cf. [Paty 1998]), il semble au contraire que la relativité générale conduise à l'abandon d'une conception du temps conçu comme dimension, au profit du temps conçu comme variation.

À la lumière de cette distinction, la position défendue par Rovelli est celle d'une variation pure au niveau de l'échelle de Planck²³. L'absence de bonnes horloges au niveau fondamental, décrite par des corrélations de variables dynamiques — desquelles ne peut émerger de variable externe et indépendante — peut alors s'interpréter comme étant du changement sans temps ou encore de la variation pure²⁴.

3.3 Le temps comme régime du devenir

Le temps, que ce soit dans son acception familière ou tel qu'on le trouve en physique, fait notamment intervenir dans sa caractérisation les notions de changement et d'évolution, de mémoire, de flux et d'écoulement, de présent, de passé, de futur, d'instant(s), d'irréversibilité et de direction, de durée, de simultanéité, de chronologie, de causalité, de continuité, de dimension et, enfin, de paramétrage et de périodicité. Or ces diverses propriétés ne s'agrègent pas univoquement pour former la notion de temps. Si ces attributs se conjuguent

22. Sur cette distinction à l'œuvre dans la théorie des équations aux dérivées partielles et son lien aux réflexions d'Hadamard concernant la relativité, cf. [Szczeciniarz 2008].

23. On peut se demander si cette variation pure implique l'absence de phénomènes périodiques ?

24. Sur le sens et la portée du concept de variation pure chez Deleuze et Guattari, cf. [Rosanvallon & Preteseille 2009].

pour constituer la tessiture du concept de temps, c'est selon des modalités fortement hétérogènes les unes aux autres. Il est rare de retrouver intégralement l'ensemble de ces déterminations subsumé dans un concept général de temps. Il semble en conséquence plus pertinent de parler de *figures* du temps, chacune se caractérisant par sa capacité à plus ou moins élaguer dans le vaste ensemble de traits propres à la temporalité. Par exemple, la propriété d'irréversibilité — absente du temps de la mécanique classique — détermine puissamment aussi bien le temps thermodynamique que la notion de temporalité telle qu'elle intervient dans bon nombre de systèmes philosophiques qui font du temps vécu par la conscience une réalité fondamentale.

Ce travail nous a conduit à l'examen de deux figures aux propriétés hétérogènes : d'abord, le temps tel qu'il apparaît à nos échelles et qui est improprement recouvert par le temps newtonien ; ensuite, cette figure de la variation pure au niveau de l'échelle de Planck. Il n'y a pas de contradiction entre ces deux incarnations si l'on accepte, à l'instar de Mach, que le temps surgit ou émerge comme syntaxe du changement. Si le temps est une abstraction à laquelle on parvient par la considération du mouvement des choses, alors c'est peut-être parce que temps et changement entretiennent des rapports qui se déterminent selon les échelles. Remarquons pour conclure qu'une telle conjecture conduirait à l'inversion de la définition bien connue du Livre IV de la *Physique* d'Aristote, à savoir le changement comme mesure du temps et non l'inverse²⁵. Elle permettrait également de rendre raison à l'idée de bon nombre de physiciens selon laquelle le temps est défini par ce que mesurent les horloges.

Je tiens à remercier chaleureusement Gwen Garcia pour sa relecture attentive et exigeante.

Bibliographie

ASHTEKAR, ABHAY (ÉD.)

2005 *100 Years of Relativity. Space-Time Structure : Einstein and Beyond*, Singapour : World Scientific.

ASHTEKAR, ABHAY & STACHEL, JOHN (ÉD.)

1991 *Conceptual Problems of Quantum Gravity*, Bâle : Birkhäuser.

BAEZ, JOHN C.

2001 Higher-dimensional algebra and Planck scale physics, dans *[Callender & Huggett 2001]*, Cambridge : Cambridge University Press, 177–195.

25. "Physics must be recast on a new foundation in which change is the measure of time, not time the measure of change" [Barbour 1999, 2].

BALIBAR, FRANÇOISE & TONCELLI, RAFFAELLA

2008 *Einstein, Newton, Poincaré. Une histoire de principes*, Paris : Belin.

BARBOUR, JULIAN

1999 *The End of Time. The next revolution in our understanding of the universe*, Londres : Phoenix, 2004.

2008 The nature of time.

www.fqxi.org/community/essay/winners/2008.1.

BARRAU, AURÉLIEN & GRAIN, JULIEN

2011 *Relativité générale*, Paris : Dunod.

BARRAU, AURÉLIEN & PARROCHIA, DANIEL (ÉD.)

2010 *Forme et origine de l'Univers. Regards philosophiques sur la cosmologie*, Paris : Dunod.

BARREAU, HERVÉ

1988 Temps et devenir, *Revue philosophique de Louvain*, 86, 5–36.

BERGSON, HENRI

1907 *L'Évolution créatrice*, Paris : Presses Universitaires de France, édité par Frédéric Worms et Arnaud François, 2007.

1923 *Durée et simultanéité*, Paris : Presses Universitaires de France, édité par Frédéric Worms et Élie During, 2009.

1934 *La Pensée et le Mouvant*, Paris : Presses Universitaires de France, édité par Frédéric Worms, Arnaud Bouaniche, Anthony Feneuil, Arnaud François, Frédéric Fruteau de Laclos, Stéphane Madelrieux, Claire Marin et Ghislain Waterloo, 2009.

BORATAV, MURAT & KERNER, RYSZARD

1991 *Relativité*, Paris : Ellipses.

BUTTERFIELD, JEREMY & EARMAN, JOHN (ÉD.)

2007 *Philosophy of Physics*, Amsterdam : Elsevier.

CALLENDER, CRAIG & HUGGETT, NICK (ÉD.)

2001 *Physics meets Philosophy at the Planck scale*, Cambridge : Cambridge University Press.

CAO, TIAN YU (ÉD.)

1999 *Conceptual Foundations of Quantum Field Theory*, Cambridge : Cambridge University Press.

CHENET, FRANÇOIS

2000 *Le Temps. Temps cosmique, temps vécu*, Paris : Armand Colin.

DASTUR, FRANÇOISE

1990 *Heidegger et la question du temps*, Paris : Presses Universitaires de France, 1994.

DESANTI, JEAN-TOUSSAINT

1992 *Variations philosophiques I, Conversations avec Dominique-Antoine Grisoni*, Paris : Grasset.

DIEKS, DENNIS (ÉD.)

2006 *The Ontology of Spacetime*, Amsterdam : Elsevier.

2008 *The Ontology of Spacetime II*, Amsterdam : Elsevier.

DREYER, OLAF

2008 Time is not the problem.

www.fqxi.org/community/essay/winners/2008.1.

DURING, ÉLIE

2011 *Bergson et Einstein : la querelle du temps*, Paris : Presses Universitaires de France.

DURING, ÉLIE & LÉVY-LEBLOND, JEAN-MARC

2009 Les découvertes philosophiques négatives de la physique contemporaine, dans *Histoire de la philosophie*, édité par PRADEAU, J.-F., Paris : Le Seuil.

EVANS, PETER W.

2010 Relativistic constraints for a naturalistic metaphysics of time.

[arXiv:1011.2285v1\[physics.hist-ph\]](https://arxiv.org/abs/1011.2285v1).

FAUSER, BERTFRIED, TOLKSDORF, JÜRGEN & ZEIDLER, EBERHARD

2007 *Quantum Gravity. Mathematical Models and Experimental Bounds*, Bâle : Birkhäuser.

FLAMENT, DOMINIQUE

1998 *Dimension, dimensions I*, Paris : Fondation de la Maison des Sciences de l'Homme.

GIULINI, DOMENICO

2007 Remarks on the notions of general covariance and background independence, dans *Approaches to Fundamental Physics*, édité par STAMATESCU, ION-OLIMPIU & SEILER, ERHARD, Berlin : Springer, 105–120.

HEGEL, GEORG WILHELM FRIEDRICH

1830 *Encyclopédie des sciences philosophiques*, Paris : Vrin, traduction française Jacques Gibelin, 1970.

JAMMER, MAX

1993 *Concepts d'espace*, Paris : Vrin, traduction française Laurent Mayet et Ivahn Smadja, 2008.

KIEFER, CLAUS

2007 Quantum gravity. A short overview, dans *Quantum Gravity. Mathematical Models and Experimental Bounds*, édité par FAUSER, BERTFRIED, TOLKSDORF, JÜRGEN & ZEIDLER, EBERHARD, Bâle : Birkhäuser, 1–13.

KLEIN, ÉTIENNE & SPIRO, MICHEL

1994 *Le temps et sa flèche*, Paris : Flammarion, 1996.

LACHIÈZE-REY, MARC

2003 *Au-delà de l'espace et du temps. La nouvelle physique*, Paris : Le Pommier, 2008.

2008 Postface, dans *[Jammer 1993]*, Paris : Vrin, 275–278.

LAUTMAN, ALBERT

1946 *Les mathématiques, les idées et le réel physique*, Paris : Vrin, 2006.

LESTIENNE, RÉMY

1985 L'espace perdu et le temps retrouvé, *Communications*, 41(1), 5–26.

LUMINET, JEAN-PIERRE

1994 Matière, Espace, Temps, dans *Le Temps et sa flèche*, édité par KLEIN, ÉTIENNE & SPIRO, MICHEL, Flammarion, 59–80.

MARKOPOULOU, FOTINI

2008 Space does not exist, so time can.
www.fqxi.org/community/essay/winners/2008.1.

MARTINETTI, PIERRE & ROVELLI, CARLO

2003 Diamonds's Temperature : Unruh effect for bounded trajectories and thermal time hypothesis.
[arXiv:0212074v4\[gr-qc\]](https://arxiv.org/abs/0212074v4).

PATY, MICHEL

1998 Les trois dimensions de l'espace et les quatre dimensions de l'espace-temps, dans *[Flament 1998]*, Fondation Maison des Sciences de l'Homme, 87–112.

PENROSE, ROGER

- 2004 *À la découverte des lois de l'Univers. La prodigieuse histoire des mathématiques et de la physique*, Paris : Odile Jacob, traduction française Céline Laroche, 2007.

RICKLES, DEAN

- 2008 *Symmetry, Structure and Spacetime*, Amsterdam : Elsevier.

ROSANVALLON, JÉRÔME & PRETESEILLE, BENOÎT

- 2009 *Deleuze & Guattari à vitesse infini*, Paris : Ollendorff & Desseins.

ROVELLI, CARLO

- 1999 'Localization' in quantum field theory : how much of qft is compatible with what we know about space-time ?, dans [Cao 1999], Cambridge : Cambridge University Press, 207–232.
- 2001 Quantum spacetime : what do we know ?, dans *Physics meets Philosophy at the Planck scale*, édité par CALLENDER, NICK, CRAIG ET HUGGETT, Cambridge : Cambridge University Press, 101–122.
- 2002 Partial observables.
[arXiv:0110035v3\[gr-qc\]](https://arxiv.org/abs/0110035v3).
- 2004 *Quantum Gravity*, Cambridge : Cambridge University Press.
- 2007 Quantum gravity, dans *Philosophy of Physics*, édité par BUTTERFIELD, JEREMY & EARMAN, JOHN, Amsterdam : Elsevier, 1287–1329.
- 2008 Forget time.
www.fqxi.org/community/essay/winners/2008.1.

ROVELLI, CARLO & SMERLAK, MATTEO

- 2010 Thermal time and the Tolman-Ehrenfest effect : temperature as the "speed of time".
[arXiv:10052985v3\[gr-qc\]](https://arxiv.org/abs/10052985v3).

SAINT-OURS, ALEXIS DE

- 2006 Des forces aux champs : l'exemple de la gravitation, *TLE*, 24, 23–38.
- 2008 Time and relation in quantum gravity, dans [Dieks 2008], Amsterdam : Elsevier.
- 2008a The rediscovery of time through its disappearance.
www.fqxi.org/community/essay/winners/2008.1.

SEILER, ERHARD & STAMATESCU, ION-OLIMPIU

- 2007 *Approaches to Fundamental Physics*, Berlin : Springer.

SMADJA, IVAHN

2008 *Réalisme et théories physiques*, Caen : Presses Universitaires de Caen.

STACHEL, JOHN

2005 Development of the concepts of space, time and space-time, dans *[Ashtekar 2005]*, Singapour : World Scientific, 3–36.

SZCZECINIARZ, JEAN-JACQUES

2008 Quelle réalité physique l'élaboration théorique mathématique permet-elle de discerner? À partir de l'article de Hadamard : « Comment je n'ai pas découvert la relativité », dans *[Smadja 2008]*, Caen : Presses Universitaires de Caen, 193–223.